

2.Воркут А.И. Разработка теоретических основ и методов рациональной организации транспортного процесса при автомобильных перевозках партионных грузов: Дисс. ... д-ра техн. наук. – К.: КАДИ, 1987. – 299 с.

3.Калининченко А.П. Разработка графиков совместной работы участников авто-транспортного процесса // Автомобильный транспорт. Вып.6. – Харьков: ХГАДТУ, 2001. – С.19-21.

*Отримано 30.05.2006*

УДК 681.513 : 620.1

В.И.НОСКОВ, канд. техн. наук

*ГП «Завод «Электротяжмаш», г.Харьков*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Рассматривается задача построения математической модели электромеханической системы подвижного состава с тяговыми асинхронными двигателями, приводятся их модели и результаты исследований с учетом технико-эксплуатационных условий функционирования и разной степени загрузки. Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей и таблиц.

Стратегической целью государственной политики Украины в развитии транспорта является создание конкурентоспособного подвижного состава, а также современных отечественных мощностей для его производства и, таким образом, резкое уменьшение импортной зависимости Украины от поставок подвижного состава из стран СНГ и Западной Европы. В частности, государственной программой «Развитие рельсового подвижного состава социального назначения для железнодорожного транспорта и городского хозяйства», предусмотрено производство современных магистральных грузовых и пассажирских локомотивов, дизель- и электропоездов, вагонов метрополитена и трамвая. К тому же, Кабинет Министров Украины утвердил концепцию Государственной целевой программы внедрения на железных дорогах скоростного движения пассажирских поездов на 2005-2015 гг. Реализация этой программы позволит связать скоростными линиями столицу Украины с большинством областных и больших индустриальных центров, увеличить скорость движения пассажирских поездов до 200 километров в час, сократить длительность пребывания пассажиров в пути с 6-10 до 3-5 часов, увеличить заполняемость пассажирских вагонов в 1,5-1,8 раза.

В ходе выполнения Государственной программы в течение последних лет ОАО ХК «Лугансктепловоз» совместно с ГП «Завод «Электротяжмаш» (г.Харьков) и ОАО НИИ «Преобразователь»

(г.Запорожье) созданы современные дизель-поезда ДЭЛ-01 и ДЭЛ-02 со скоростью движения до 120 км/ч с электрической передачей переменного тока, в которой использованы тяговые асинхронные двигатели (ТАД), преобразователи частоты (ПЧ) и микропроцессорное управление. Прохождение Государственных испытаний и сдача в эксплуатацию в 2002 г. первого украинского дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом показывает, что действительно тяговый асинхронный электропривод (ТАЭП) имеет перспективу, особенно при создании скоростных поездов, поскольку при одинаковой мощности тяговых агрегатов, напряжении питания и ряде других параметров ТАЭП обладает лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с приводами на постоянном токе. При этом уменьшается трудоемкость изготовления тяговых двигателей примерно на 20%, уменьшаются не менее чем на 40% затраты на их обслуживание и ремонт. Применение электропривода с ТАД практически полностью исключает контактную аппаратуру, повышает тяговые свойства локомотива, снижает массу установленного оборудования, позволяет улучшить технологичность, материалоемкость, стоимость и ряд других технико-экономических показателей.

На перспективность использования ТАЭП указывают и исследования, проводимые за рубежом. Анализ последних зарубежных разработок тягового подвижного состава (ТПС) показывает, что во всех случаях без исключения предпочтение отдается ТАЭП как наиболее перспективному для магистрального и городского транспорта. Так, начиная с середины 1999 г. японские железные дороги покупают скоростные электропоезда только с ТАД и ПЧ. С аналогичными техническими решениями изготавливают современные локомотивы с электрической передачей американская фирма «Дженерал Электрик», Европейские фирмы «Адтранц», «Сименс», «Альстом» и «Шкода».

Поскольку при создании скоростных поездов на этапе проектирования необходимо решить ряд вопросов, связанных с выбором параметров электропривода, силового агрегата, элементов механической части электропривода (редуктора), определения характеристик и количества тяговых двигателей и ряда других компонент, необходимо провести соответствующие исследования по их выбору. Как следует из [1-3], для проведения исследований статических и динамических характеристик проектируемых элементов и систем поезда может успешно применяться метод математического моделирования и идентификации. А с появлением современных быстродействующих ПЭВМ и пакетов прикладных программ моделирования непрерывных систем значительно расширилась возможность детализации описания элементов

систем и учета факторов, возникающих в процессе эксплуатации поездов и которые могут оказывать существенное влияние на работоспособность системы в целом [4, 5].

При исследовании энергетической системы поезда с ТАЭП возникает ряд вопросов, связанных с моделированием ее компонент и систем, таких как блока синхронный генератор-выпрямитель, преобразователей частоты, ТАД, элементов электромеханической части электропривода и нагрузки. Вопросам разработки математических моделей и исследованиям с их помощью как отдельных компонент электропередачи поездов, так и их систем управления посвящено большое число публикаций. Среди них только в работах [6-8] впервые комплексно рассматриваются вопросы проектирования локомотивов на основе ТАЭП с использованием моделирования для решения задач идентификации и синтеза систем управления, функционирующих согласно заданному критерию качества и задачи, которые возникают в процессе их создания. Однако, предлагаемые модели довольно сложные и требуют значительных затрат машинного времени и времени для проведения многовариантных исследований, возникающих в процессе проектирования систем.

Целью настоящей работы является создание моделей подвижного состава с ТАЭП и на их основе проведение исследований с целью определения структуры, параметров электропередачи и технических требований к компонентам проектируемой системы: силовому агрегату, электроприводу, тяговым двигателям, элементам механической части электропривода.

Модель подвижного состава в простейшем случае может быть представлена уравнением движения:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_C, \quad (1)$$

где  $\omega = \frac{v}{R_K}$ ;  $J = m R_K^2$ ;  $M_T$  – момент тяги состава;  $M_C$  – момент сопротивления движению;  $J$  – момент инерции;  $\omega$  – угловая скорость;  $v$  – скорость движения состава;  $R_K$  – радиус колеса;  $m$  – масса груженого состава.

Момент тяги состава (без учета процессов буксования) определяется количеством ( $n$ ) используемых на реализацию силы тяги электродвигателей, их характеристиками, определяющими формирование электромагнитного момента, передаточным числом редуктора. Для определения значения электромагнитного момента тягового электро-

двигателя можно воспользоваться системой дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в ТАД [8] или экспериментальными характеристиками двигателя.

Скорость состава с учетом используемой единицы измерения в правилах производства тяговых расчетов (ППТР) (км/ч) определяется соотношением:

$$V = 3,6 \omega R_K . \quad (2)$$

Определение момента тяги  $M_T$  в процессе движения поезда осуществляется согласно уравнениям:

$$M_T = F_T(V) R_K ; \quad (3)$$

$$F_m = G_H [102 (1 + \gamma) a_m + W_0] ; \quad (4)$$

$$G_H = 9,81 m , \quad (5)$$

где  $F_T(V)$  – внешняя характеристика электропривода;  $F_m$  – максимальное усилие при разгоне;  $G_H$  – вес груженного состава;  $(1+\gamma)$  – коэффициент инерции вращающихся масс ( $\gamma = 0,1$ );  $a_m$  – максимальное ускорение;  $W_0$  – коэффициент сопротивления движению (при разгоне  $W_0 = 1,1$ ).

Определение момента сопротивления  $M_C$  в процессе движения поезда осуществляется согласно уравнениям:

$$M_C = i R_K W_0 G_H , \quad (6)$$

$$W_0 = 1,1 + 0,012 V + 0,00025 V^2 , \quad (7)$$

где  $i$  – коэффициент уклона пути (для горизонтального участка  $i = 1$ );  $V$  – скорость поезда.

Для идентификации внешней характеристики электропривода с целью построения математической модели поезда в качестве исходных данных использованы результаты экспериментальных исследований, проведенные на дизель-поезде ДЭЛ-01. Характеристики электропривода (значение силы тяги на различных позициях контроллера машиниста, соответствующие значения скорости поезда, КПД, реализуемая мощность электропередачи, тяговый момент, приведенный к колесной паре), с учетом мощности собственных нужд ( $P_{CH}$ ) приведены в табл.1.

В результате идентификации получены зависимости силы тяги 8-вагонного поезда при различном количестве тяговых двигателей соответствующей мощности. На рис.1 приведена внешняя тяговая характеристика электропривода для случая использования 16 тяговых элек-

тродвигателей ( $n=16$ ).

Таблица 1 – Основные характеристики привода при  $P_{сн} = 0$  кВт

Тяга, т	Скорость, км/ч	КПД, %	Мощность, кВт	Момент, Нм
7,6	19,5	81,2	206,6	4727
5,4	28,6	83,5	213,0	3323
3,55	44,0	84,8	217,4	2205
2,3	68,7	84,5	217,8	1412
1,5	103,0	83,8	217,0	938
1,2	130,0	83,1	216,2	738

Аналогичные статические тяговые характеристики получены для электропривода, включающего 8 или 20 тяговых двигателей. Число двигателей  $n = 8$  взято для варианта дизель-поезда и  $n = 20$  – для работы в режиме электропоезда.

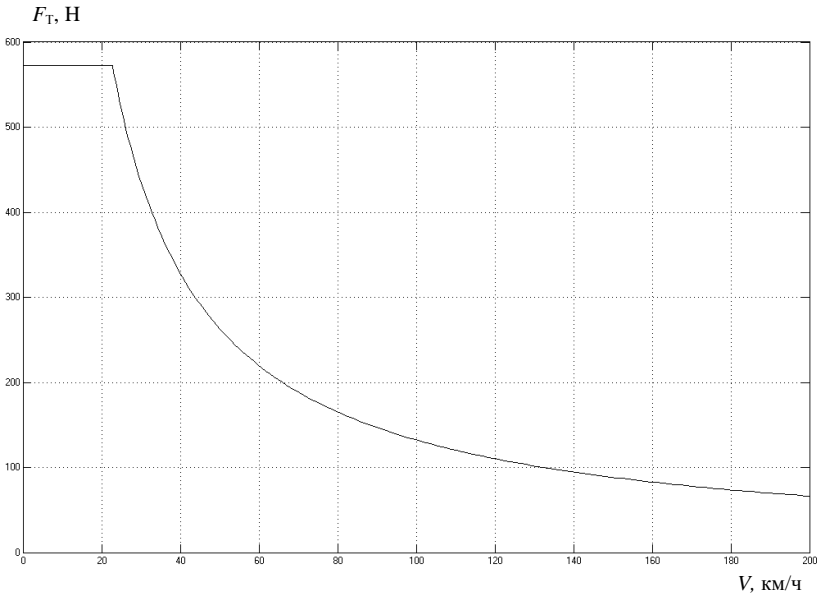


Рис.1 – Внешняя тяговая характеристика электропривода

Структурная схема модели для определения скорости поезда в зависимости от параметров электропривода и условий движения приведена на рис.2. Она состоит из следующих элементов: блока вычисления момента тяги состава  $M_T$ ; блока вычисления момента сопротивления движению  $M_C$ ; блока вычисления коэффициента  $K$ ; блока ин-

тегрирования (оператор  $1/p$ ). Коэффициент  $K$  определяется как:

$$K = \frac{3,6}{m R_K}.$$

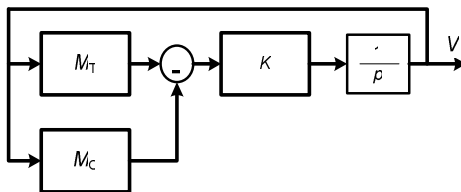


Рис.2 – Структурная схема модели

Функциональные схемы моделей блоков вычисления момента тяги электродвигателя, момента сопротивления движению поезда, скорости поезда согласно соотношениям (1)-(7) приведены соответственно на рис.3-5.

В процессе исследований динамики поезда рассматривалось влияние изменения параметров поезда, таких как загруженность состава, сила тяги и величина удельного сопротивления движению. Загруженность состава моделировалась путем изменения количества пассажиров. При этом изменение их количества рассматривалось по отношению к расчетному как в сторону увеличения (+25%, +50%), так и в сторону уменьшения (–25%, –50%).

Изменение силы тяги, что соответствует возможному изменению напряжения контактной сети, моделировалось путем изменения силы тяги по отношению к расчетному значению аналогично загруженности поезда. Соответствующие данные для одного из вариантов структуры поезда приведены в табл.2.

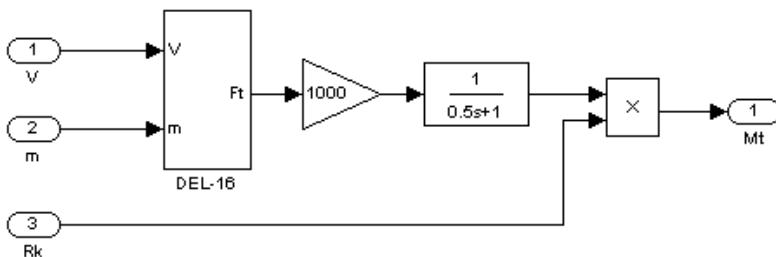


Рис.3 – Функциональная схема машинной модели блока вычисления момента тяги электродвигателя

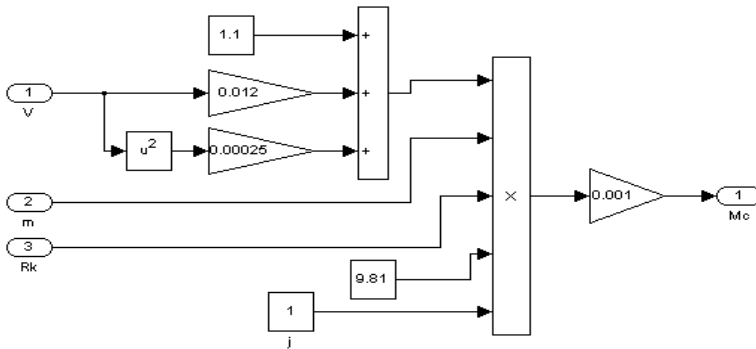


Рис.4 – Функциональная схема модели блока вычисления момента сопротивления движению поезда

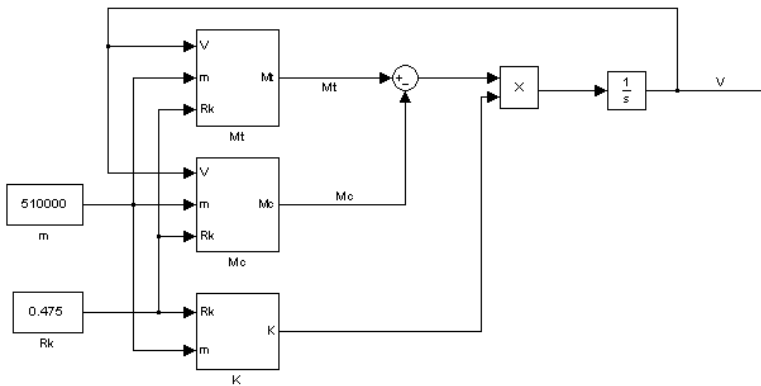


Рис.5 – Функциональная схема модели вычисления скорости поезда

Влияние момента сопротивления в зависимости от скорости движения моделировалось путем изменения составляющей удельного сопротивления, зависящей от квадрата скорости. Эта составляющая характеризует аэродинамические характеристики поезда, которые могут быть улучшены конструктивными изменениями кузова.

В процессе исследований предполагалось, что разгон проводится на горизонтальном участке пути, т.е. коэффициент уклона равен единице, и при отсутствии буксования колесных пар поезда. Приведенные процессы соответствуют расчетным значениям параметров поезда. Возможные отклонения параметров от расчетных и результаты иссле-

дований для одного из вариантов приведены в табл.2, в которой отражены результаты исследований динамики восьмивагонного поезда в процессе разгона до скорости 200 км/ч при условии питания электропередачи поезда от контактной сети. При этом передаточное число редуктора ( $\mu = 2,26$ ), максимальная мощность двигателя – 270 кВт, число тяговых двигателей равно 20 ( $n=20$ ).

Таблица 2 – Результаты исследований в режиме электропоезда  
( $n = 20$ ,  $\mu = 2,26$ ,  $P_{дв} = 270$  кВт)

№ п/п	Исследуемый параметр	Значение параметра	Время разгона до 200 км/ч, с	Среднее ускорение до 70 км/ч, м/с <sup>2</sup>
1	Загруженность состава	расчетная	248,9	0,7564
		+ 25%	251,5	0,7542
		+ 50%	254,2	0,7520
		– 25%	246,3	0,7585
		– 50%	243,7	0,7607
2	Сила тяги	расчетная	248,9	0,7564
		+ 5%	228,2	0,7949
		– 2%	258,4	0,7409
		– 5%	274,5	0,7178
3	Составляющая при $V^2$ уд. сопрот. движения $W_0$	расчетная	248,9	0,7564
		+ 2%	251,9	0,7563
		– 2%	246,0	0,7565
		– 5%	241,9	0,7566
		– 10%	235,6	0,7569

На рис.6 показана зависимость изменения скорости движения от времени. Приведенные процессы соответствуют требуемым значениям параметров поезда.

В табл.3 приведены результаты исследований динамики поезда в процессе разгона при условии питания электропередачи поезда от четырех дизель-генераторных установок мощностью 460 кВт каждая. При этом передаточное число редуктора составляет 2,82, максимальная мощность двигателя – 240 кВт, число тяговых двигателей равно 8.

На рис.7 приведена зависимость изменения скорости движения дизель-поезда от времени.

В результате исследований установлены технические требования к выбору параметров электропривода, характеристикам тяговых двигателей, силовому агрегату, элементам механической части электропривода (редуктора). В табл.4 приведены рекомендуемые значения параметров дизель- и электропоездов, состоящих из 8 вагонов и соответствующие достижимые значения технических показателей (среднее ускорение до 70 км/ч для электропоездов и среднее ускорение до 25 км/ч для дизель-поездов, максимально достижимая скорость при номиналь-



ной нагрузке, время разгона до соответствующей скорости 160 или 200 км/ч).

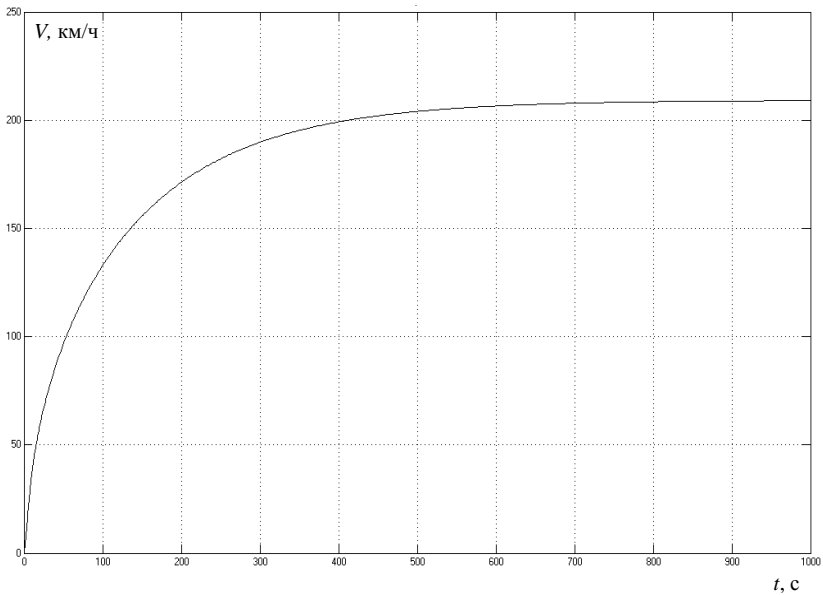


Рис.6 – Зависимость скорости от времени ( $n = 16$ ;  $\mu = 2,82$ ;  $P_{\text{дв}} = 270$  кВт)

Таблица 3 – Результаты исследований в режиме дизель-поезда  
( $n = 8$ ;  $\mu = 2,82$ ;  $P_{\text{дв}} = 240$  кВт)

№ п/п	Исследуемый параметр	Значение параметра	Время разгона до 150 км/ч, с	Среднее ускорение до 25 км/ч, м/с <sup>2</sup>
1	Загруженность состава	расчетная	653,2	0,8290
		+ 25%	675,5	0,8261
		+ 50%	700,4	0,8232
		– 25%	633,0	0,8318
		– 50%	614,6	0,8347
2	Сила тяги	расчетная	653,2	0,8290
		+ 5%	526,9	0,8705
		– 2%	743,4	0,8123
		– 5%	–	0,7873
3	Составляющая при $V^2$ уд. сопро-т. движения $W_0$	расчетная	653,2	0,8290
		+ 2%	696,8	0,8289
		– 2%	619,3	0,8290
		– 5%	579,5	0,8290
		– 10%	530,7	0,8290

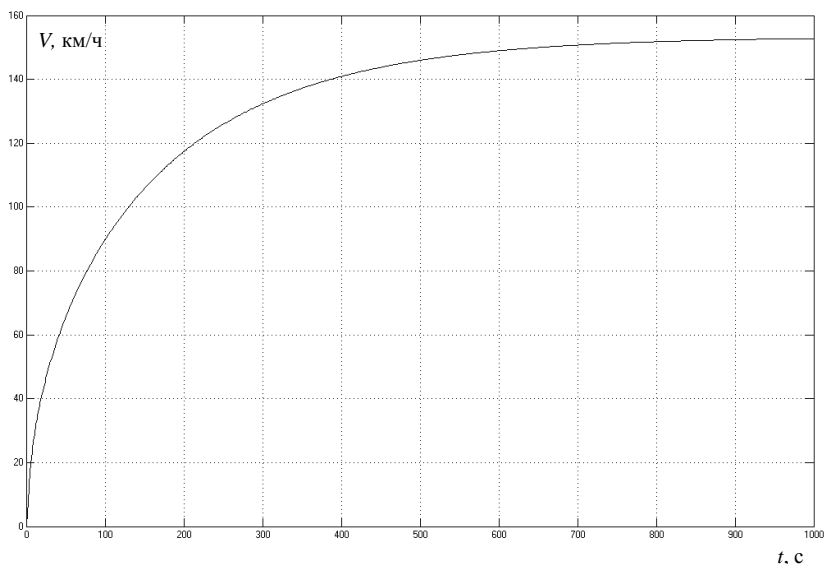


Рис.7 – Зависимость скорости от времени ( $n = 8$ ;  $\mu = 2,82$ ;  $P_{дв} = 240$  кВт)

Таблица 4 – Результаты исследований

№ п/п	Объект исследования	Число двигателей $n$	Передаточное число редуктора $\mu$	Мощность двигателя, кВт	Время разгона, сек	Скорость, км/ч	Среднее ускорение, $м/с^2$
1	Электропоезд	16	2,82	270	162,3	160	0,7152
2	Электропоезд	16	2,26	270	415,5	200	0,6653
3	Электропоезд	20	2,26	270	248,9	200	0,7564
4	Дизель-поезд	8	2,82	230	653,2	150	0,8290
5	Дизель-поезд	8	2,82	270	426,1	150	0,8841

Таким образом, исследования, проведенные с помощью моделей электропередач подвижного состава для магистрального и городского транспорта, в частности 8-вагонного электро- и дизель-поездов позволили установить следующее:

1) для создания скоростного электропоезда с учетом обеспечения максимальной скорости до 160 км/ч и заданным средним ускорением до 70 км/ч не менее  $0,7 \text{ м/с}^2$ , требуется электродвигатель с мощностью 270 кВт при использовании редуктора с передаточным числом равным

2,82, и отношением сила тяги к массе состава, равной 8,47 Вт/кг. При этом общее количество электродвигателей равно 16;

2) для создания скоростного электропоезда с учетом обеспечения максимальной скорости до 200 км/ч и заданным средним ускорением до 70 км/ч не ниже  $0,7 \text{ м/с}^2$ , требуется электродвигатель с мощностью 270 кВт при использовании редуктора с передаточным числом равным 2,26 и отношением сила тяги к массе состава, равной 10,6 Вт/кг. При этом общее количество двигателей равно 20;

3) для случая исполнения дизель-поезда в комплектации 8 вагонов и 8 тяговых двигателей, каждый мощностью 230 кВт и использования редуктора с передаточным числом равным 2,82, скорость 150 км/ч достигается за 653 с, при среднем ускорении до 25 км/ч не менее  $0,83 \text{ м/с}^2$ . При этом суммарная мощность дизелей должна быть не менее 1840 кВт;

4) для случая исполнения дизель-поезда в комплектации 8 вагонов и 8 тяговых двигателей, каждый мощностью 270 кВт и использования редуктора с передаточным числом равным 2,82, скорость 150 км/ч достигается за 426 с, при среднем ускорении до 25 км/ч не менее  $0,88 \text{ м/с}^2$ . При этом суммарная мощность дизелей должна быть не менее 2160 кВт.

В зависимости от технических требований данные результаты исследований позволяют осуществить выбор силового агрегата, структуру электропередачи, определить параметры тяговых электродвигателей и их количество при проектировании подвижного состава.

1.Носков В.И., Марченко В.С., Михневич Г.А. и др. Перспективы и проблемы внедрения асинхронного электропривода на тепловозах // Сб. науч. трудов НИИ завода "Электротяжмаш" и МЭТП. Вып.1. – Харьков, 1989. – С.40–44.

2.Степанов А.Д. и др. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов. – М.: Транспорт, 1982. – 254 с.

3.Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.

4.Носков В.И., Шпика Н.И., Яровой Г.И. О создании тяговых асинхронных электроприводов в НПО "Электротяжмаш" // Новини енергетики. – 2001. – № 9. – С.86-88.

5.Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.

6.Даниленко А.Ф., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И. Математические модели оптимальных систем управления тяговым асинхронным приводом тепловозов // Электронное моделирование. – 1991. – Т.13, №2. – С.40–44.

7.Верлань А.Ф., Дмитриенко В.Д., Корсунов Н.И., Шорох В.А. Эволюционные методы компьютерного моделирования. – К.: Наукова думка, 1992. – 256 с.

8.Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. – Харьков: ХФИ „Транспорт Украины”, 2003. – 248 с.

Получено 29.06.2006